

## 川东地区寒武系洗象池群颗粒滩 储集层发育特征及主控因素\*

王必金<sup>1</sup> 刘晨虎<sup>2</sup> 刘 漪<sup>3</sup> 刘皓天<sup>3</sup> 陈绵琨<sup>3</sup> 陈兰朴<sup>3</sup> 于晓娜<sup>3</sup>

1 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司, 湖北潜江 433100

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北武汉 430070

**摘 要** 川东地区平桥 1 井在寒武系洗象池群获得工业气流, 揭示该层位具有一定的勘探前景。基于野外露头、岩心、薄片、录井与测井资料, 应用储层地质学方法, 研究了洗象池群颗粒滩储集层发育分布, 结果表明: (1) 川东地区洗象池群可识别出台坪旋回、潮缘旋回和潮下旋回, 颗粒滩主要发育在潮缘和潮下旋回, 潮缘旋回颗粒滩形成于水体变浅的高位体系域中上部高能带, 与周期性暴露的台坪旋回交互, 发生准同生溶蚀作用; 而潮下旋回颗粒滩发育于海侵体系域与高位体系域下部高能带, 与深潮下低能带交互, 未经历暴露溶蚀作用。(2) 川东地区颗粒滩发育于台洼东侧边缘, 储集层主要岩性是残余砂屑白云岩和粉—细晶白云岩, 储集空间为粒间(溶)孔和晶间(溶)孔; 平均孔隙度与渗透率分别为 3.24%、 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ , 具有低孔低渗的特点。(3) 潮缘旋回颗粒滩的发育受古地貌的影响, 其是否受到准同生期大气淡水溶蚀是储集层形成的关键。

**关键词** 颗粒滩储集层 潮缘旋回 大气淡水溶蚀 洗象池群 川东地区

**第一作者简介** 王必金, 男, 1968 年生, 博士, 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探开发工作。E-mail: wbj\_jhyjy@163.com。

**通讯作者简介** 刘晨虎, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, 主要从事四川盆地碳酸盐岩储集层研究。E-mail: 383241987@qq.com。

中图分类号: TE122.2 文献标志码: A

## Characteristics and main controlling factors of shoal reservoirs in the Cambrian Xixiangchi Group, eastern Sichuan Basin

WANG Bijin<sup>1</sup> LIU Chenhu<sup>2</sup> LIU Yi<sup>3</sup> LIU Haotian<sup>3</sup> CHEN Miankun<sup>3</sup> CHEN Lanpu<sup>3</sup> YU Xiaona<sup>3</sup>

1 Sinopec Jianghan Oilfield Company, Hubei Qianjiang 433100, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Research Institute of Exploration and Development, Jianghan Oilfield Company, Sinopec, Wuhan 430070, China

**Abstract** The well Pingqiao 1 in the eastern Sichuan Basin achieved commercial gas flow in the Cambrian Xixiangchi Group, demonstrating significant exploration potential in this stratigraphic unit.

\* 中国石油化工股份有限公司科研项目“渝东—鄂西地区下组合常规天然气勘探潜力评价”(编号: P22077)资助。[Financially supported by the research project “Evaluation of conventional natural gas exploration potential of lower combination in the East Chongqing-West Hubei Region” of China Petroleum and Chemical Corporation (No. P22077)]

Based on outcrop, core, thin section, logging and well-log data, the development and distribution of shoal reservoir in Xixiangchi Group has been studied by reservoir geology method. The results show that: (1) The tidal flat cycle, peritidal cycle and subtidal cycle are identified. Shoal deposits predominantly develop in the peritidal and subtidal cycles. Peritidal shoals are located at the middle-upper part of high-stand system tracts where shallow-water conditions interacted with periodically exposed events, resulting in penecontemporaneous dissolution. Subtidal shoals formed in transgressive system tracts (TST) and lower HST high-energy zones, interfacing with low-energy deep subtidal environments without significant exposure-related dissolution. (2) The shoals in the eastern Sichuan Basin are developed in the eastern margin of the low-lying area of the platform, and are dominated by dolarenite and silt-fine crystal dolomite lithofacies. Reservoir spaces primarily consist of intergranular (dissolved) pores and intercrystalline (dissolved) pores. The average porosity and permeability are 3.24% and  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ , respectively, showing the characteristics of low porosity and permeability reservoirs. (3) The development of shoals in the peritidal cycle is affected by the paleogeomorphology, and whether it is dissolved by atmospheric fresh water in the quasi-contemporaneous period is the key to reservoir formation.

**Key words** shoal reservoir, peritidal cycle, meteoric freshwater dissolution, Xixiangchi Group, eastern Sichuan Basin

**About the first author** WANG Bijin, born in 1968, Ph.D., professor-level senior engineer of Sinopec Jiangnan Oilfield Company, is mainly engaged in oil and gas exploration and development. E-mail: wbj\_jhyjy@163.com.

**About the corresponding author** LIU Chenhu, born in 1998, master degree candidate, specializes in geological sources and geological engineering, and is mainly engaged in the study of carbonate rock reservoir in Sichuan Basin. E-mail: 383241987@qq.com.

四川盆地中上寒武统洗象群在川中地区具有较高的探明储量(赵爱卫, 2015; 林怡等, 2017), 而位于川东地区的平桥 1 井在洗象池群获得了工业气流, 表明该层位具有一定的勘探潜力。洗象池群主要为局限台地相(张满郎等, 2010; 李皎和何登发, 2014; 谷明峰等, 2020; 石书缘等, 2022), 川东地区中部为川东凹陷, 凹陷西侧为川中古隆起, 东侧地势逐渐降低。凹陷两侧边缘带发育颗粒白云岩, 其北西侧川中地区储集层研究表明储集岩为颗粒白云岩和细—粉晶白云岩, 发育粒间(溶)孔、晶间(溶)孔、溶洞、裂缝多种储集空间, 孔隙度集中分布在 2%~6%, 为低孔低渗储集层(赵爱卫等, 2015; 林怡等, 2017), 累计厚度在 5~48 m。而川东凹陷边缘带洗象池群颗粒白云岩储集层的发育分布, 尤其是哪种类型的颗粒滩能够发育为储集层是本研究的主要内容。

本研究对于平桥 1 井和平桥 2 井岩心、南川三泉剖面进行了观察和描述, 并根据枫 1 井、建深 1 井、利 1 井、太和 1 井、焦石 1 井、楼探 1 井、座

3 井等钻井资料, 对川东地区洗象池群沉积旋回进行识别, 结合结构组分差异的影响, 从而分析不同沉积旋回中所发育的颗粒滩的区别, 明确沉积旋回对于颗粒滩发育的影响。

## 1 区域地质背景

研究区位于四川盆地东部(图 1-a), 研究层位为寒武系中上寒武统洗象池群。洗象池群地层主要岩性为晶粒白云岩和颗粒白云岩, 也可见砂质白云岩和泥质白云岩(图 1-b), 整体沉积时间约为 15 Ma(邓成昆等, 2022)。川东及川东南地区洗象池群在石柱、南川一带地层厚 600~700 m, 秀山地区地层甚至可达 1000 m(文华国等, 2022)。

四川盆地中上寒武系洗象池群沉积相整体属于碳酸盐岩镶边台地, 沉积相自西向东依次发育混积台坪、局限—半局限台地、台地边缘、斜坡和盆地(赵爱卫, 2015; 井攀, 2017; 贾鹏等, 2021; 文华国等, 2022)。川东地区洗象池群主要发育局限台地相, 进一步可分为台坪、浅潮下、深潮下 3 个

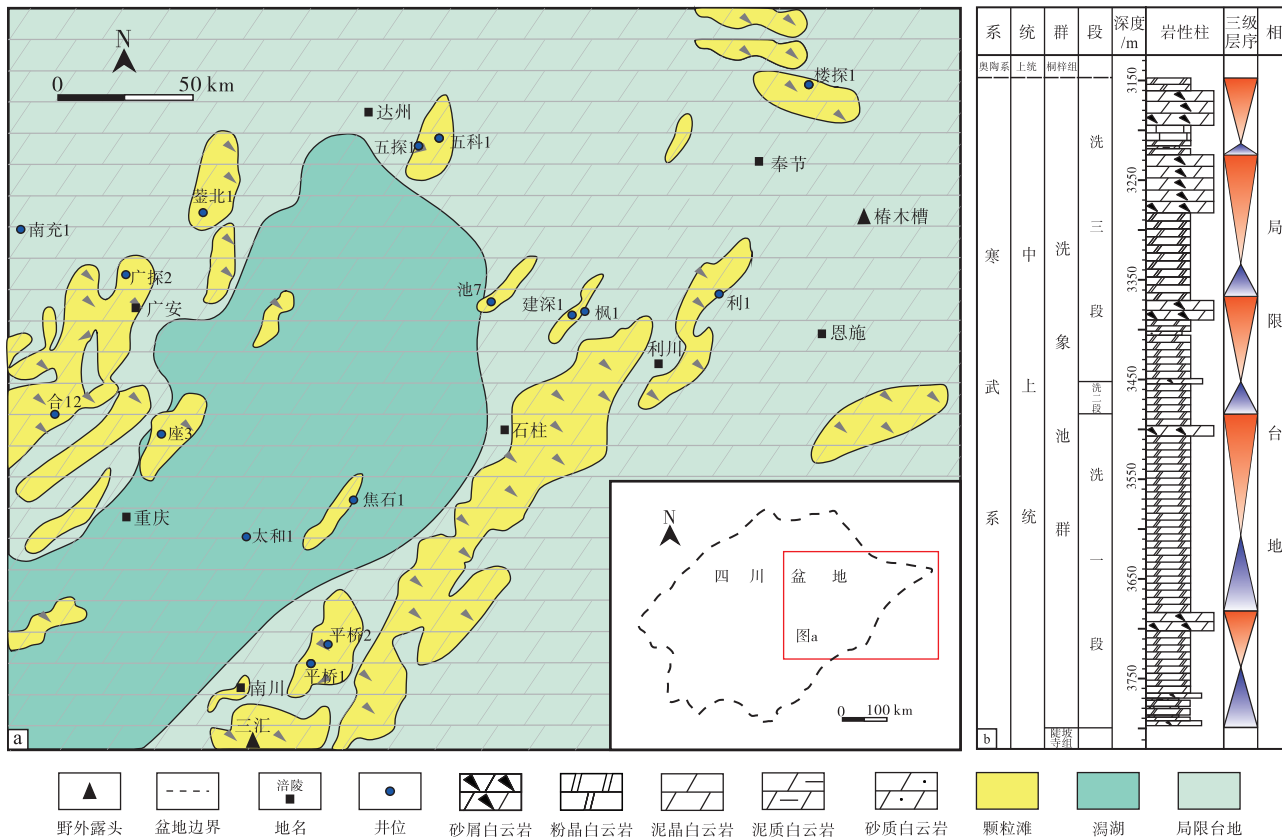


图 1 川东地区洗象池群沉积相及平桥 1 井地层柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies distribution of the Xixiangchi Group and stratigraphy column of Well Pingqiao-1 in eastern Sichuan Basin

沉积相带。

总体上，洗象池群沉积期继承了早寒武世晚期一中寒武世的沉积格局，呈西北高、东南低的古地理格局（石书缘等，2022），川中地区表现出同沉积古隆起特征，由于离物源区较远，且处于古地貌高地，利于颗粒滩发育，滩体单层厚度相对较大（井攀等，2016）；而川东地区在宜宾—万州一带发育凹陷，以低能沉积的潟湖相为主，凹陷边缘东侧古地貌相对较高，此处也发育多期颗粒滩。

川东地区洗象池群地层整体可以划分为 5 个三级层序（陈文等，2016；李伟等，2019），每个三级层序由海侵体系域和高位体系域组成（王素芬等，2008）。洗一段包括下部的 2 个三级层序，洗二段包括第 3 个三级层序的海侵体系域，洗三段包括第 3 个三级层序的高位体系域和上部的 2 个三级层序。

## 2 沉积旋回类型及特征

川东地区洗象池群根据晴天浪基面、平均海平

面和平均高潮面的相对位置可分为台坪、浅潮下和深潮下 3 个沉积相带（图 2）。通过岩心及野外剖面识别，结合海平面升降，认为川东研究区可以分为 3 种沉积旋回组合：台坪旋回，潮缘旋回和潮下旋回。

### 2.1 台坪旋回

台坪旋回（图 3-a）主要包含潮上带和潮间带（图 2），其特征是潮间和潮上相互频繁叠置，沉积旋回由下至上暴露程度逐渐增加。下部发育潮间带沉积，岩性主要为灰色—浅灰色粉晶白云岩，能量较高时可发育潮间滩，见少量砂屑白云岩。上部发育潮上带沉积，岩性主要为浅灰色泥—粉晶白云岩、粉—细晶白云岩，具有石膏结核、干裂、鸟眼构造等表征暴露环境的相标志（图 4-a，4-b），可见水平层理。由于长期处于暴露环境，水动力条件很弱，仅见少量颗粒白云岩夹层，无法形成规模滩体，且颗粒白云岩孔隙发育程度低、物性差。

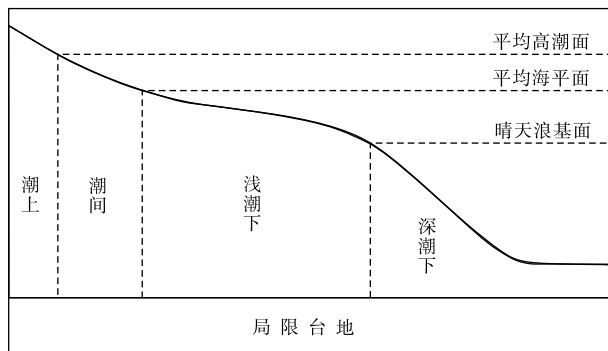


图 2 川东地区洗象池群沉积相带划分  
(据金振奎等, 2013; 修改)

Fig. 2 Sedimentary facies division of Xixiangchi Group in eastern Sichuan Basin (modified from Jin *et al.*, 2013)

### 2.2 潮缘旋回

潮缘旋回(图 3-b)由潮下带中的高能潮下坪和潮间—潮上沉积交替组合构成, 单个沉积旋回厚度在 1.4~2.6 m 之间。该沉积旋回下部以发育浅潮下颗粒滩为主, 单滩体厚度在 0.8~1.5 m, 岩性主要为灰色—浅灰色残余砂屑白云岩或粉—细晶白云岩为主, 可见交错层理、平行层理等沉积构造(图 4-c 至 4-e), 颗粒白云岩中平均颗粒含量为 65.8%。上部发育以中薄层泥—粉晶白云岩为主的台坪相。垂向上由下至上, 水体呈现由深至浅的变化, 该沉积旋回中的颗粒滩遭受周期性的暴露, 溶蚀作用明显, 颗粒间孔隙部分得以保留, 为储集层的发育奠定了基础。

### 2.3 潮下旋回

潮下旋回(图 3-c)整体处于潮下带的沉积环境, 主要由局限低能潮下坪(简称局限潮下)和浅潮下低能颗粒滩垂向叠置组成。在潮下旋回中, 其下部发育局限潮下, 岩性以灰色—深灰色的泥质泥晶白云岩、泥—粉晶白云岩为主。上部发育低能潮下滩, 岩性为灰色砂屑泥晶白云岩或泥晶砂屑白云岩, 颗粒白云岩中颗粒含量为 63.7%。由于潮下旋回沉积环境整体处于海平面之下, 水体能量较低且不发生暴露, 岩石颜色较深, 胶结物含量较高, 物性差。

## 3 储集层特征

### 3.1 储集层岩石学特征

根据露头、岩心以及岩石薄片观察, 四川盆地

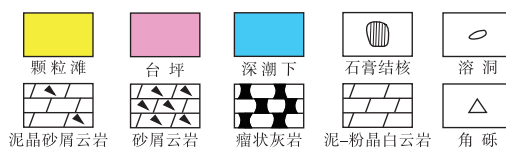
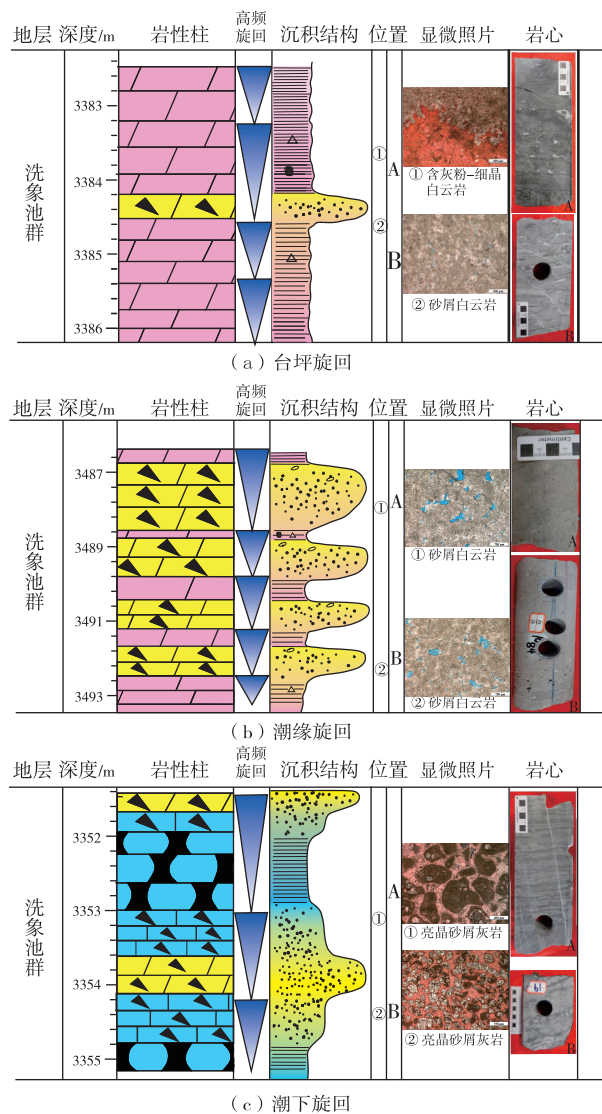


图 3 川东地区平桥 2 井洗象池群沉积旋回特征  
Fig. 3 Depositional cycles of the Xixiangchi Group in Well Pingqiao-2, eastern Sichuan Basin

东部洗象池群储集层的岩性以颗粒白云岩为主, 颗粒以砂屑为主。颗粒灰岩的原始结构由于经受白云岩化作用或重结晶作用等成岩作用的影响, 遭受一定的破坏, 颗粒自身及颗粒之间的结构都会因此而发生变化(张学丰等, 2010)。因此依据颗粒白云岩内部结构保留的程度, 研究区洗象池群的主要的储集层岩性可划分为残余颗粒白云岩和粉—细晶白云岩。



a—砂屑白云岩, 平行层理, 南川三泉剖面, 第 65 层; b—砂屑白云岩, 平行层理, 南川三泉剖面, 第 63 层; c—砂屑白云岩, 交错层理, 南川三泉剖面, 第 63 层; d—砂屑白云岩, 溶洞, 平桥 2 井, 3431.1 m; e—砂屑白云岩, 针孔, 平桥 2 井, 3349.2 m; f—砂屑白云岩, 针孔, 平桥 2 井, 3390.7 m; g—泥—粉晶白云岩, 干裂, 鸟眼构造, 平桥 2 井, 3261.2 m; h—泥—粉晶白云岩, 裂缝, 石膏结核, 平桥 1 井, 3426.4 m; i—砂屑白云岩, 裂缝, 平桥 1 井, 3232.6 m

图 4 川东地区洗象池群沉积构造

Fig. 4 Depositional structures of the Xixiangchi Group in eastern Sichuan Basin

### 3.1.1 残余颗粒白云岩

残余颗粒白云岩(图 5-a 至 5-e) 的颗粒轮廓较为清晰, 颗粒结构部分可见, 胶结物与颗粒之间存在可区分界限。镜下可见岩石为颗粒支撑, 颗粒间呈点一线接触, 分选中等, 颗粒磨圆较好。颗粒含量在 50%~70% 之间, 粒径在 0.1~1.2 mm 之间, 主要由粉晶白云石组成。颗粒之间主要为亮晶白云石胶结, 保存程度较好则可区分 2 期胶结物。储集空间以粒间溶孔、残余粒间溶孔为主, 其次为晶间孔, 面孔率可达 25%。若受到白云石化或重结晶作用影响较大, 颗粒会形成幻影结构(图 5-d, 5-e), 内部结构被破坏。该类型残余颗粒白云岩与胶结物之间的界线较为清晰, 主要的储集空间为

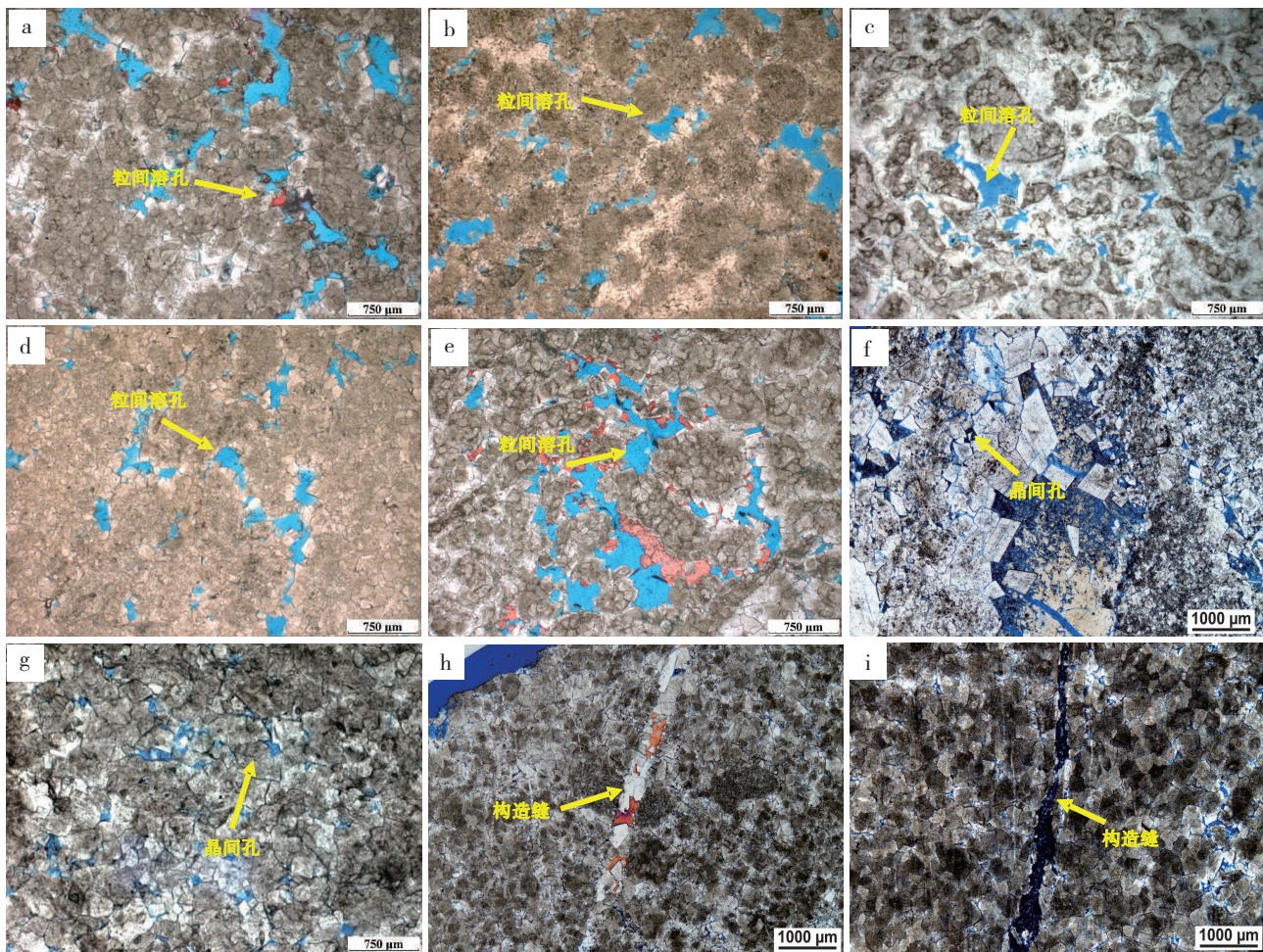
粒间溶孔和晶间孔。

### 3.1.2 粉—细晶白云岩

颗粒白云岩遭受强烈改造后, 结构会被完全破坏, 会形成为粉—细晶白云岩(图 5-h)。颗粒结构已不可见, 与胶结物或基质之间无法区分。岩石薄片镜下观察, 可见粉晶和细晶白云石晶粒呈半自形—他形, 镶嵌式接触, 晶粒粒径主要在 0.03~0.2 mm 之间, 颗粒原始结构已无法辨识。储集空间以晶间孔为主。相比于残余颗粒白云岩, 其孔隙发育程度较低, 面孔率一般小于 10%, 最高不超过 15%。

### 3.2 储集空间类型

研究区洗象池群储集空间类型较为多样, 根据



a—残余砂屑白云岩，粒间溶孔，孔隙内充填粒状白云石胶结物和方解石胶结物，南川三泉剖面第 55 层，蓝色铸体；b—残余砂屑白云岩，粒间溶孔，孔隙内充填粒状白云石胶结物，南川三泉剖面第 61 层，蓝色铸体；c—残余砂屑白云岩，粒间溶孔，孔隙内充填白云石胶结物，南川三泉剖面第 64 层，蓝色铸体；d—残余砂屑白云岩，粒间溶孔，颗粒幻影结构，平桥 2 井，3347.3 m，蓝色铸体；e—残余砂屑白云岩，粒间溶孔，颗粒幻影结构，南川三泉剖面第 64 层，蓝色铸体；f—中晶白云岩，晶间孔，平桥 1 井，3486.2 m，蓝色铸体；g—细晶白云岩，晶间孔，平桥 2 井，3443.8 m，蓝色铸体；h—残余砂屑白云岩，构造缝，平桥 2 井，3332.2 m，蓝色铸体；i—残余砂屑白云岩，构造缝，平桥 2 井，3328.5 m，蓝色铸体

图 5 川东地区洗象池群储集岩与储集空间显微照片

Fig. 5 Micrograph of reservoir rock and reservoir space of the Xixiangchi Group in eastern Sichuan

野外露头、岩心和岩石薄片的观察及鉴定，认为川东地区洗象池群储集层的储集空间类型主要为粒间溶孔，其次为晶间孔，可见少量的裂缝及溶洞。

### 3.2.1 残余粒间孔和粒间溶孔

当颗粒间胶结物的发育程度低或含量少时，可形成残余粒间孔，孔径大小介于 0.02~1.2 mm 之间，面孔率在 3%~10% 之间。粒间溶孔是准同生期大气淡水淋滤作用下，颗粒间的胶结物或基质被溶蚀而形成的。颗粒之间可见溶蚀形成的溶蚀港湾（图 5-a 至 5-c）。粒间溶孔作为川东地区洗象池群最为主要的储集空间，在残余颗粒白云岩中发育

程度较高（图 5-a 至 5-e）。

### 3.2.2 晶间孔和晶间溶孔

白云石晶体间的孔隙称为晶间孔（图 5-f，5-g），该类孔隙主要发育于晶粒结构的白云岩中，其形成主要是由于颗粒岩受到白云石化作用或重结晶作用影响，导致晶体发生重新排列，孔隙发生调整而形成的。晶间孔周围的白云石晶体边界平直，未见溶蚀痕迹，孔径范围在 0.02~0.3 mm 之间，孔隙形状较为规则（图 5-f，5-g）。晶间孔遭受溶蚀作用会形成晶间溶孔。研究区内洗象池群晶间孔发育程度高于晶间溶孔。

### 3.2.3 裂缝

川东地区洗象池群以发育构造裂缝为主。岩心上可见高角度缝(图 4-h, 4-i), 野外剖面的岩石薄片镜下可见裂缝切穿颗粒(图 5-h, 5-i), 岩心的岩石薄片镜下裂缝多平直, 部分被方解石或白云石充填, 均为构造成因的裂缝。裂缝主要是改善孔隙之间的连通性, 提高储集层的孔渗性。

### 3.3 储集层物性特征

通过岩心及野外取得的 70 件物性样品的分析统计可以看出, 川东地区洗象池群残余颗粒白云岩孔隙度分布范围在 0.05%~10.59%, 对于洗象池群储集层(孔隙度大于 2%), 其孔隙一般分布范围为 2%~5%, 潮缘旋回中颗粒滩储集层渗透率的分布范围在  $(0.003\sim 314.253)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  之间。根据储集层级别划分(李珂, 2016), 研究区储集层主要为 III 类储集层, 部分储集层物性较好, 可划分为 II 类储集层。表明洗象池群基岩整体致密, 具有低孔低渗特征, 局部发育的储集层孔隙度相对较高, 川东地区洗象池群储集层为孔隙型储集层, 其孔隙结构简单。

## 4 储集层主控因素

### 4.1 沉积旋回对颗粒滩储集层的差异控制作用

3 种沉积旋回中, 台坪旋回由于长期处于暴露

环境, 只能见到少量颗粒白云岩, 而无法形成颗粒滩, 故只研究潮缘旋回和潮下旋回的颗粒滩。潮缘旋回颗粒滩最为发育, 该沉积旋回中颗粒滩和台坪相互叠置, 表明海平面发生频繁的升降, 使颗粒滩周期性暴露, 受大气淡水溶蚀作用而产生较多的溶孔。潮下旋回由于长时间处于水体较深的环境, 发育的颗粒滩物性较差。潮缘旋回颗粒滩平均孔隙度和平均渗透率为 2.87% 和  $4.18\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 明显优于潮下旋回的 1.18% 和  $0.44\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  (图 6-a, 6-b), 整体物性较好(图 6-c)。

潮下旋回和潮缘旋回颗粒白云岩的平均粒径、中值粒径以及分选系数无明显差异(图 7-a, 7-b), 表明 2 种沉积旋回颗粒滩的形成环境无明显差别, 而潮缘旋回颗粒白云岩的颗粒含量明显高于潮下旋回(图 7-c), 潮下旋回胶结物平均含量为 35.05%, 潮缘旋回平均含量为 19.03%, 胶结物含量相对较低(图 7-d), 颗粒含量与白云石胶结物含量呈现负相关性, 表明 2 种旋回颗粒滩原始孔隙度不存在较大差异。从平桥 2 井洗象池群岩心也可看出, 针孔和溶洞(图 4-f 至 4-h)在潮缘旋回的颗粒滩中最为发育, 且储集层也集中发育在该旋回组合的颗粒滩中。潮下旋回和潮缘旋回颗粒滩以胶结程度和准同生溶蚀方面的差异为主。潮下旋回水体较深, 不发生暴露, 不同旋回之间界面较为平直, 因此颗粒滩致密, 胶结物含量高, 仅残留少量

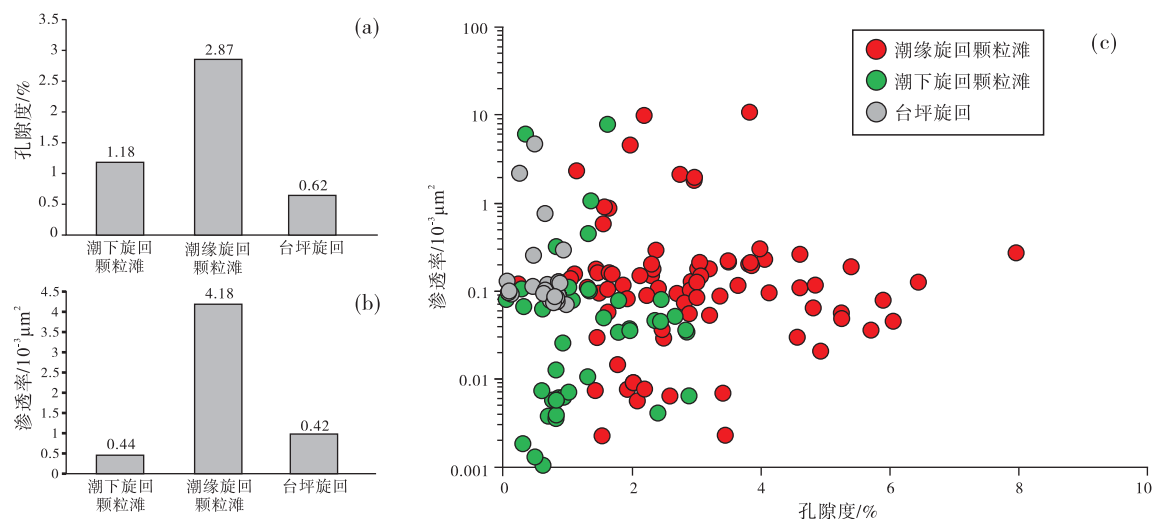


图 6 川东洗象池群不同沉积旋回颗粒白云岩平均孔隙度直方图(a)、平均渗透率直方图(b)

和孔隙度-渗透率散点图(c)

Fig. 6 Histogram of average porosity (a), average permeability (b), and cross plot of porosity and permeability (c) for grainstone dolomite in different sedimentary cycles of the Xixiangchi Group, eastern Sichuan Basin

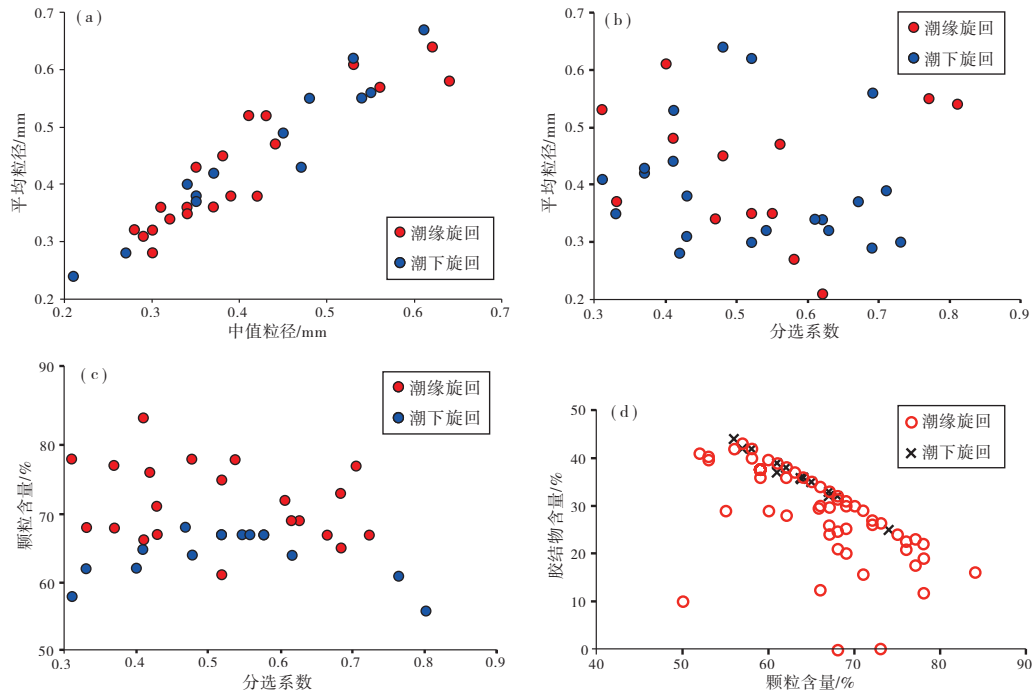


图 7 川东洗象池群潮下旋回与潮缘旋回颗粒白云岩平均粒径与中值粒径交汇图 (a)，平均粒径与分选系数交汇图 (b)，颗粒含量与分选系数交汇图 (c) 与颗粒滩胶结物与颗粒含量交汇图 (d)  
 Fig. 7 Cross-plots of mean and median grain size (a), average grain size and sorting coefficient (b), particle content and sorting coefficient (c) and shoal cement and particle content (d) of subtidal and peritidal cycles grainstone dolomite of the Xixiangchi Group, eastern Sichuan Basin

粒间孔隙 (江文剑等, 2016)。潮缘旋回水体较浅, 暴露频繁, 不同旋回间界面凹凸不平, 并具有一定的溶蚀特征, 胶结物含量低于潮下旋回, 有利于储集层发育。

通过川中地区广探 2 井和川东地区平桥 2 井对比来看 (图 8), 广探 2 井所处位置地势较高, 且洗象池群沉积时期水体较浅, 滩体发育, 垂向上储集层与颗粒滩比值为 89.7% (邓成昆等, 2022), 沉积旋回以潮缘旋回为主, 潮缘旋回颗粒滩厚度可占到整体滩体厚度的 82.4%, 孔隙度为 2%~10%, 集中分布在 2%~6% 之间, 平均孔隙度为 3.9%, 渗透率为  $(0.01 \sim 34.9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ , 平均为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ , 而川东地区洗象池群沉积时期水体相对较深, 且古地貌较川中地区低, 从平桥 2 井柱状图中可以看出, 潮下旋回比川中地区更加发育, 而潮缘旋回颗粒滩占比相对较低, 孔隙度主要分布在 2%~5% 之间, 储集层的物性及发育程度均低于川中地区。

#### 4.2 准同生溶蚀作用对储集层的控制作用

洗象池群颗粒滩发育过程中, 海平面发生周期性升降, 从而发生准同生期的溶蚀作用。作为川东

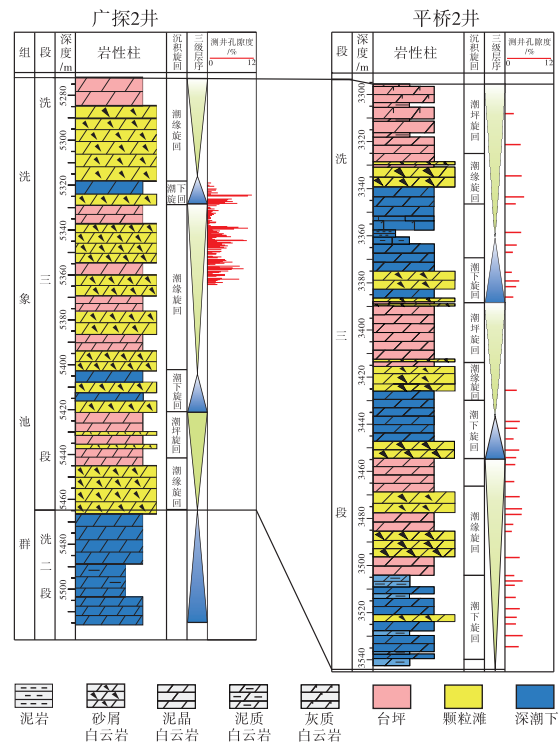


图 8 川东地区洗象池群广探 2 井—平桥 2 井联井对比图  
 Fig. 8 Correlation of the Xixiangchi Group in Wells Guangtan-2 and Pingqiao-2 in eastern Sichuan Basin

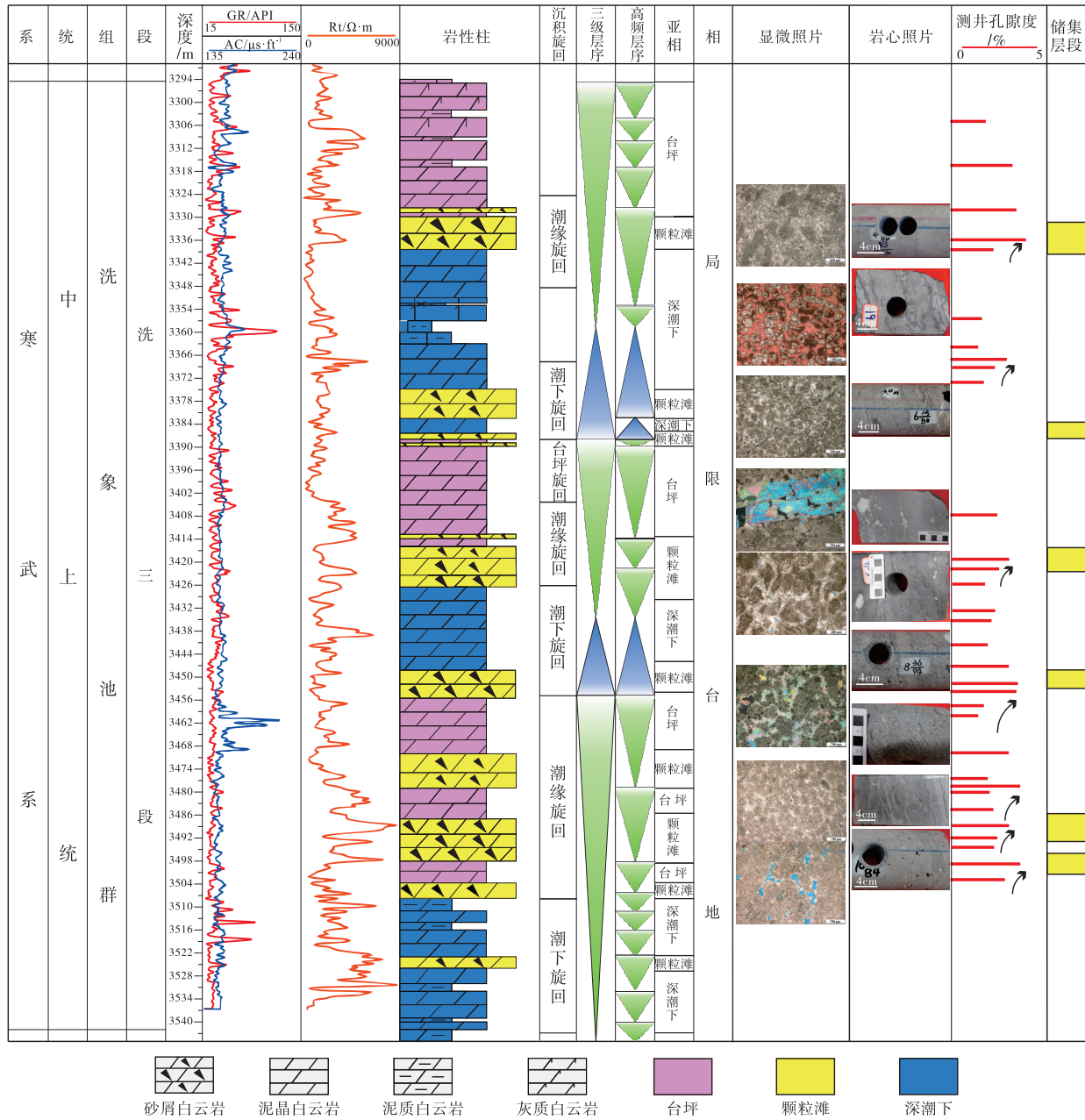


图 9 川东地区平桥 2 井洗象池群综合柱状图

Fig. 9 Comprehensive column of the Xixiangchi Group in Well Pingqiao-2, eastern Sichuan Basin

地区洗象池群储集层储集空间的发育影响最大的因素，准同生溶蚀作用的控制作用最为重要。

准同生溶蚀作用特征之一就是具有组构选择性，其表现主要是通过大气淡水溶蚀，使岩石中的文石、高镁方解石等不稳定的矿物发生溶解，颗粒和颗粒之间形成的海底纤状胶结物发生溶解，从而形成粒间溶孔和粒内溶孔等溶蚀孔洞；岩心上则表现为发育针孔、溶蚀孔隙。若长时间处于微地貌高地局部或长时间暴露，可形成非组构选择性溶孔

(李旭兵等，2012)。

准同生溶蚀作用使储集层发育具有纵向差异性。由于准同生溶蚀作用受到海平面升降控制 (李凌等，2008)，导致其作用时间和深度都较为有限，故溶蚀作用对于颗粒滩的影响只能限于一定深度。在该过程中，接近溶蚀界面处，大气淡水作用可在颗粒白云岩中形成较多的溶孔和溶洞，随着深度的加大，溶蚀作用逐渐减弱，溶蚀孔洞也随之变少，在颗粒滩沉积旋回内部与物性之间具有正相关性 (肖笛，

2017; 周进高等, 2020)。从平桥 2 井的岩心可看出, 潮缘旋回内的颗粒滩从下部至上部, 针孔和溶洞的发育程度是逐渐增加的, 岩心的孔隙度和渗透率也存在旋回性, 颗粒滩主要发育在高位体系域的中上部(图 9), 表现出在准同生溶蚀作用下, 储集层具有一定的纵向差异性。

川东凹陷东部地区边缘处波浪作用较为强烈, 影响的范围较大, 沉积界面与浪基面频繁发生交错, 水体能量较高, 滩体发育, 随着海平面下降或滩体不断地垂向加积导致沉积界面升高(李凌等, 2013), 部分滩体会逐渐暴露于海平面之上, 为准同生溶蚀作用创造了良好的条件。当海平面下降过快或沉积界面快速升高时, 可在一期颗粒滩顶部短暂地形成台坪沉积, 从而组合为一个完整的潮缘旋回。随着新一期海侵的发生, 海平面重新上升, 台坪之上再次沉积新的滩体, 重新形成新一期的沉积旋回。川东洗象池群颗粒滩厚度介于 20~210 m 之间(图 10-a), 以南川—石柱—奉节一带最为发育, 颗粒滩在单个旋回中的占比在 54.8%~62.3% 之间, 由于潮缘旋回中颗粒滩受到准同生溶蚀作用, 储集空间发育, 在颗粒滩中占比在 54%~69% 之间, 有效储集层厚度普遍大于 50 m, 平桥 1 井和焦石 1 井中储集层厚度可达 103 m(图 10-b)。

太和 1 井区域, 由于位于凹陷内部, 古地貌相对较低, 在三级层序中, 发生缓慢海侵时, 水体深度变化较慢, 在垂向上可形成一定厚度的浅潮下低能颗粒滩, 当海平面持续升高时, 则可在低能滩上形成深潮下的低能沉积, 当次一级的海平面再次变浅, 即可再次形成浅潮下低能滩, 即形成深潮下一浅潮下低能滩组合的潮下旋回, 发育在洗象池群的三级层序的海侵体系域和高位体系域的中下部。由于水体较深, 能量较低, 缺乏暴露, 太和 1 井颗粒滩厚度为 52 m(图 10), 且颗粒滩在单一高频层序内占比在 25.3%~37.6% 之间, 厚度在 4~6 m 之间, 整体厚度小于 20 m, 储集空间不发育。

## 5 结论

1) 川东地区洗象池群沉积旋回可划分为台坪旋回、潮缘旋回和潮下旋回。台坪旋回由潮间带和潮上带组成, 发育在高位体系域上部, 常处于暴露

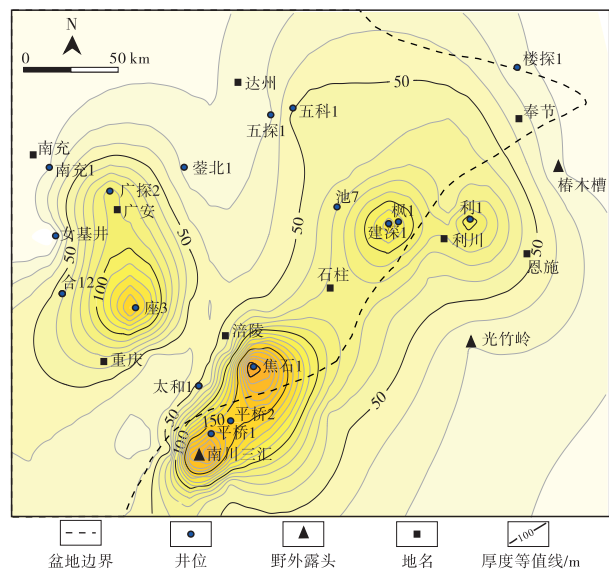


图 10 川东地区洗象池群颗粒滩厚度等值线图

Fig. 10 Contour map of shoal thickness of the Xixiangchi Group in eastern Sichuan Basin

环境, 仅发育少量颗粒白云岩, 未形成滩体; 潮缘旋回由浅潮下高能滩和台坪组成, 发育在三级层序高位体系域中上部, 滩体易周期性暴露发生准同生溶蚀作用, 胶结物含量低, 溶蚀孔洞发育, 具备形成储集层的条件; 潮下旋回由深潮下和浅潮下颗粒滩组成, 主要发育在三级层序高位体系域下部和海侵体系域, 难发生暴露溶蚀, 颗粒滩胶结物含量高、仅残存少量粒间孔、物性差。

2) 川东地区洗象池群颗粒滩主要发育于川东凹陷东侧边缘处, 储集岩为残余砂屑白云岩和粉—细晶白云岩, 储集空间主要为残余粒间溶孔、晶间(溶)孔和小型的溶洞; 平均孔隙度和渗透率为 3.24%、 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ , 为低孔低渗的 III 级储集层。

3) 潮缘旋回颗粒滩的发育受古地貌的影响, 其是否受到大气淡水溶蚀是储集层形成的关键。在川中地区古隆起部位为颗粒滩最发育的区域, 潮缘旋回颗粒滩厚度可占到滩体总厚度的 82.4%; 而川东地区洗象池颗粒滩累计厚度变化较大, 在平桥 1 井, 焦石 1 井构造区颗粒滩累计厚度可达 150 m 以上, 由于古地貌较川中古隆起区域较低, 其潮缘旋回颗粒滩占比明显小于川中地区。

## 参考文献 (References)

- 陈文, 刘鑫, 曾乙洋. 2016. 川中地区洗象池组小层划分及沉积演化特征. 天然气勘探与开发, 39(1): 6-8, 16, 100-101. [Chen

- W, Liu X, Zeng Y Y. 2016. Substrata division and sedimentary evolution of Xixiangchi Formation, central Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 39(1): 6-8, 16, 100-101]
- 邓成昆, 黎霆, 杨伟强, 张玺华, 程忠贞, 陈浩如, 诸丹诚, 胡力文, 邹华耀. 2022. 川中地区中上寒武统洗象池组颗粒滩储集层特征及主控因素. *古地理学报*, 24(2): 292-307. [Deng C K, Li T, Yang W Q, Zhang X H, Cheng Z Z, Chen H R, Zhu D C, Hu L W, Zou H Y. 2022. Characteristics and main controlling factors of shoal reservoirs in the Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Formation, central Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 292-307]
- 谷明峰, 李文正, 邹倩, 周刚, 张建勇, 吕学菊, 严威, 李堃宇, 罗静. 2020. 四川盆地寒武系洗象池组岩相古地理及储层特征. *海相油气地质*, 25(2): 162-170. [Gu M F, Li W Z, Zou Q, Zhou G, Zhang J Y, Lü X J, Yan W, Li K Y, Luo J. 2020. Lithofacies palaeogeography and reservoir characteristics of the Cambrian Xixiangchi Formation in Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(2): 162-170]
- 贾鹏, 黄福喜, 林世国, 宋涛, 高阳, 吕维宁, 汪少勇, 刘策, 范晶晶, 欧阳靖琳. 2021. 四川盆地及其邻区中上寒武统洗象池群沉积相与沉积模式特征研究. *现代地质*, 35(3): 807-818. [Jia P, Huang F X, Lin S G, Song T, Gao Y, Lü W N, Wang S Y, Liu C, Fan J J, Ouyang J L. 2021. Sedimentary facies and model characteristics of middle upper Cambrian Xixiangchi group in Sichuan Basin and its adjacent areas. *Geoscience*, 35(3): 807-818]
- 金振奎, 石良, 高白水, 余宽宏. 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式. *沉积学报*, 31(6): 965-979. [Jin Z K, Shi L, Gao B S, Yu K H. 2013. Carbonate facies and facies models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 965-979]
- 江文剑, 侯明才, 邢凤存, 徐胜林, 林良彪. 2016. 川东南寒武系娄山关群白云岩成岩作用特征. *石油实验地质*, 38(3): 311-319. [Jiang W J, Hou M C, Xing F C, Xu S L, Lin L B. 2016. Diagenetic characteristics of Dolomites in the Cambrian Loushanguan Group in southeastern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(3): 311-319]
- 井攀. 2017. 川中南部地区寒武系洗象池组层序地层及沉积相研究. 成都理工大学硕士学位论文: 55. [Jing P. 2017. The research on the sequence and the distribution of sedimentary facies of Upper Cambrian Xixiangchi Formation in the southern area of central Sichuan Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 55]
- 井攀, 黄加力, 百成钢, 陈智远, 徐芳良, 陈彦梅. 2016. 四川盆地洗象池组层序地层及沉积相研究现状. *山东化工*, 45(11): 65-66, 69. [Jing P, Huang J L, Bai C G, Chen Z Y, Xu F G, Chen Y M. 2016. The present research situation of sequence and sedimentary facies of Xixiangchi Formation of Sichuan Basin. *Shandong Chemical Industry*, 45(11): 65-66, 69]
- 李皎, 何登发. 2014. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造-沉积环境演化. *古地理学报*, 16(4): 441-460. [Li J, He D F. 2014. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(4): 441-460]
- 李珂. 2016. 四川盆地东南部洗象池群沉积相及与储层的关系. 西南石油大学硕士学位论文: 1-72. [Li K. 2016. Sedimentary facies of Xixiangchi Group and its relationship with reservoir in southeast Sichuan Basin. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University: 1-72]
- 李凌, 谭秀成, 夏吉文, 罗冰, 陈景山. 2008. 海平面升降对威远寒武系滩相储层的影响. *天然气工业*, 28(4): 19-21, 135. [Li L, Tan X C, Xia J W, Luo B, Chen J S. 2008. Influences of eustatic movement on the Cambrian Reservoirs of bank facies in Weiyuan gas field, the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 28(4): 19-21, 135]
- 李凌, 谭秀成, 赵路子, 刘宏, 夏吉文, 罗冰. 2013. 碳酸盐台地内部滩相薄储集层预测: 以四川盆地威远地区寒武系洗象池群为例. *石油勘探与开发*, 40(3): 334-340. [Li L, Tan X C, Zhao L Z, Liu H, Xia J W, Luo B. 2013. Prediction of thin shoal-facies reservoirs in the carbonate platform interior: a case from the Cambrian Xixiangchi Group of the Weiyuan Area, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 334-340]
- 李伟, 樊茹, 贾鹏, 卢远征, 张志杰, 李鑫, 邓胜徽. 2019. 四川盆地及周缘地区中上寒武统洗象池群层序地层与岩相古地理演化特征. *石油勘探与开发*, 46(2): 226-240. [Li W, Fan R, Jia P, Lu Y Z, Zhang Z J, Li X, Deng S H. 2019. Sequence stratigraphy and lithofacies paleogeography of Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Group in Sichuan Basin and its adjacent area, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2): 226-240]
- 李旭兵, 刘安, 曾雄伟, 王传尚, 白云山. 2012. 雪峰山西侧地区寒武系娄山关组碳酸盐岩储层特征研究. *石油实验地质*, 34(2): 153-157. [Li X B, Liu A, Zeng X W, Wang C S, Bai Y S. 2012. Characteristics of carbonate reservoirs of Cambrian Loushanguan Formation to the west of Xuefeng Mountain. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2): 153-157]
- 林怡, 陈聪, 山述娇, 曾乙洋, 刘鑫, 陈友莲. 2017. 四川盆地寒武系洗象池组储层基本特征及主控因素研究. *石油实验地质*, 39(5): 610-617. [Lin Y, Chen C, Shan S J, Zeng Y Y, Liu X, Chen Y L. 2017. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Cambrian Xixiangchi Formation in the Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(5): 610-617]
- 石书缘, 胡素云, 汪泽成, 文龙, 徐祖新, 刘伟, 谢武仁, 姜华, 卞从胜, 刘静江, 陆彬, 苏旺, 冯庆付, 周刚, 郝涛. 2022. 四川盆地寒武系洗象池组滩相白云岩规模储层发育特征及勘探意义. *石油实验地质*, 44(3): 433-447, 475. [Shi S Y, Hu S Y, Wang Z C, Wen L, Xu Z X, Liu W, Xie W R, Jiang H, Bian C S, Liu J J, Lu B, Su W, Feng Q F, Zhou G, Hao T. 2022. Characteristics and exploration prospect of dolograins beach reservoir in Xixiangchi Formation, Cambrian, Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 433-447, 475]
- 王素芬, 李伟, 张帆, 王兴志. 2008. 乐山—龙女寺古隆起洗象池群有利储集层发育机制. *石油勘探与开发*, 35(2): 170-174. [Wang S F, Li W, Zhang F, Wang X Z. 2008. Developmental mechanism of advantageous Xixiangchi Group Reservoirs in Leshan-Longnüsi palaeohigh. *Petroleum Exploration and Development*, 35(2): 170-174]
- 文华国, 梁金同, 周刚, 邱玉超, 刘四兵, 李堃宇, 和源, 陈浩如. 2022. 四川盆地及周缘寒武系洗象池组层序-岩相古地理演化与天然气有利勘探区带. *岩性油气藏*, 34(2): 1-16. [Wen H G, Liang J T, Zhou G, Qiu Y C, Liu S B, Li K Y, He Y, Chen H R. 2022. Sequence-based lithofacies paleogeography and favorable natural gas

- exploration areas of Cambrian Xixiangchi Formation in Sichuan Basin and its periphery. *Lithologic Reservoirs*, 34(2): 1-16]
- 肖笛. 2017. 海相碳酸盐岩早成岩期岩溶及其储层特征研究: 以中国西部三大盆地为例. 西南石油大学博士学位论文: 1-136. [Xiao D, 2017, Research on eogenetic karst of marine carbonate and its reservoir in the three major basins, western China. Doctoral dissertation of Southwest Petroleum University: 1-136]
- 张满郎, 谢增业, 李熙喆, 谷江锐, 杨威, 刘满仓. 2010. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征. *沉积学报*, 28(1): 128-139. [Zhang M L, Xie Z Y, Li X Z, Gu J R, Yang W, Liu M C. 2010. Characteristics of lithofacies paleogeography of Cambrian in Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(1): 128-139]
- 张学丰, 刘波, 蔡忠贤, 胡文璋. 2010. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性. *地质科技情报*, 29(3): 79-85. [Zhang X F, Liu B, Cai Z X, Hu W X. 2010. Dolomitization and carbonate reservoir formation. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 79-85]
- 赵爱卫. 2015. 四川盆地及周缘地区寒武系洗象池群岩相古地理研究. 西南石油大学硕士学位论文: 1-62. [Zhao A W. 2015. The research on lithofacies palaeogeography in the Cambrian Xixiangchi Group of Sichuan Basin and its adjacent areas. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University: 1-62]
- 赵爱卫, 谭秀成, 李凌, 罗冰, 洪海涛, 刘吉伟, 王勇, 段卓. 2015. 四川盆地及其周缘地区寒武系洗象池群颗粒滩特征及分布. *古地理学报*, 17(1): 21-32. [Zhao A W, Tan X C, Li L, Luo B, Hong H T, Liu J W, Wang Y, Duan Z. 2015. Characteristics and distribution of grain banks in the Cambrian Xixiangchi Group of Sichuan Basin and its adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(1): 21-32]
- 周进高, 席胜利, 邓红婴, 于洲, 刘新社, 丁振纯, 李维岭, 唐瑾. 2020. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征. *天然气工业*, 40(2): 41-53. [Zhou J G, Xi S L, Deng H Y, Yu Z, Liu X S, Ding Z C, Li W L, Tang J. 2020. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(2): 41-53]

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)

## 纪念冯增昭先生诞辰百年邀稿函

尊敬的专家:

您好!

2026 年是我国著名地质学家冯增昭先生诞辰百年, 为纪念冯先生对地质事业的巨大贡献, 《古地理学报》将全年刊登为纪念冯先生诞辰百年而撰写的学术文章, 一方面是对冯先生的怀念与追思, 另一方面也是支持冯先生创办的《古地理学报》, 让冯先生创办的事业发扬光大。

冯增昭先生是我国著名石油地质学专家, 我国碳酸盐岩沉积学科的开创者和奠基人, 为祖国的高等教育事业和地质事业工作了七十年! 冯先生曾获李四光地质科学奖(科研奖)、国家级教学成果二等奖、国家科技进步奖二等奖、中国石油天然气总公司优秀教材特等奖及科技进步奖一等奖、山东省及北京市奖励 14 项; 冯先生是享受中国国务院政府特殊津贴的有突出贡献的科技专家、中国石油工业有突出贡献的科技专家; 冯先生曾获中国沉积学终身成就奖、2013 年获得“创校功勋奖”、2022 年获得“北京榜样”年度提名奖。

冯增昭先生一生著作齐身, 他著有《沉积岩石学》、《中国沉积学》等沉积学著作 8 部, 《华北地台早古生代岩相古地理》、《中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理》等岩相古地理学著作 14 部, 《沉积岩成因》、《碳酸盐岩分类文集》等沉积学翻译著作 5 部及文章 10 余篇, 发表第一作者文章 107 篇、非第一作者文章 37 篇, 共 1700 万字以上。

冯增昭先生退而不休。1999 年, 他 73 岁时创办了《古地理学报》; 2012 年, 他 86 岁时创办了《古地理学报》(英文版); 2013 年, 他 87 岁时发起筹建国际古地理学会, 并于 2022 年 7 月成立, 成为我国成立的地质学领域惟一国际性学术组织。他发起成立“中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会”, 并组织两年一次的“全国古地理学及沉积学学术会议”, 至今已连续召开十七届; 他发起并组织两年一次的“国际古地理学会议”, 至今连续召开六届。

在冯增昭先生诞辰百年之际, 特向各位专家学者发出邀请, 请您就古地理学及相关领域撰写文章, 内容包括但不限于岩相古地理学及沉积学、生物古地理学及古生态、构造古地理学及古构造、第四纪古地理学、古地理学及矿产资源、人类历史时期古地理学、大数据古地理学及数智化时代的古地理学。

感谢各位专家学者的大力支持, 期盼您赐稿。

《古地理学报》编辑部

二〇二五年六月